ساخت عملگر نرم نوین با طول عمر بالا با استفاده از سیلیکون الاستومر و اتانول*

مقاله پژوهشی

حجت زامیاد(۱)   امیرحسین ابراهیمی(۲)   سمانه صاحبیان(۳)   جواد صفائی(۴)

چکیده

قابلیت کاربری عملگرهای مرسوم همانند موتورها و ماهیچه‌های مصنوعی هیدرولیکی و پنوماتیکی به دلیل وزن زیاد، ابعاد بزرگ، صدای بیش از اندازه در بسیاری از حوزه‌ها محدود شده است. در همین راستا، در سال‌های اخیر بسیاری از محققین و دانشمندان تحقیقات گسترده‌ای جهت معرفی نسل جدیدی از عملگرهای هوشمند، ارزان قیمت، با ابعاد کوچک و سبک انجام داده‌اند. در این پژوهش ربات نرم با پاسخگویی سریع، با استفاده از کامپوزیت پلیمری با زمینه سیلیکونی و اتانول به عنوان سیال تغییر فازدهنده (فاز ثانویه) ساخته و رفتار حرکتی و پاسخ دمایی آن تحت دوره و سیکل‌های متعدد کاری بررسی شد. در اثر تحریک الکتریکی و بواسطه فشار داخلی ایجاد شده درون میکروکپسول‌های حاوی اتانول که به صورت تصادفی در زمینه کامپوزیت توزیع شده، در دمای تغییر فاز اتانول ، نیروی مکانیکی مورد نیاز جهت جابه‌جایی ربات نرم مهیا می‌گردد. بررسی رفتار حرکتی ربات نرم، بیانگر پاسخگویی مطلوب در روز اول و دوم کاری(به ترتیب ۸/۵۵ و ۶/۲ میلی‌متر جابه‌جایی) بود. هم‌چنین ثبت دمای سطحی و داخلی کامپوزیت، نشان‌دهنده پایداری دمایی ماده بوده، به طوریکه دمای سطح و هسته به ترتیب حداکثر به ۴۸ و ۸۱ درجه سانتی‌گراد رسید. هم‌چنین ماده در پایان دوره تحریک و در روز هفتم، حدود ۱۱٪ کاهش وزن در اثر هدر رفت اتانول داشته که بیانگر عملکرد مطلوب کامپوزیت در خصوص انبارش و حفظ سیال تغییر فازدهنده است.

واژه‌های کلیدی ربات نرم؛ رفتار حرکتی؛ سیال تغییر فازدهنده، سیلیکون، اتانول.

Novel High-Cycle-Life Soft Actuator Using Silicon Elastomer Matrix and Ethanol

H. Zamyad   A. M. Ebrahimi   S. Sahebian   J. Safaie

Abstract

The application of conventional actuators such as hydraulic and pneumatic motors and artificial muscles is limited in many areas due to their heavy weight, large dimensions, and excessive noise. In recent years, many researchers and scientists have conducted extensive research to introduce a new generation of smart, inexpensive, small, and lightweight operators. In this research, a soft robot with a fast response, using a polymer composite with silicon matrix and ethanol as a phase-changing fluid (secondary phase), was made. Its kinetic behavior and temperature response under several periods and working cycles were investigated. Due to the electrical actuation and the internal pressure created inside the microcapsules containing ethanol, which are randomly distributed in the composite matrix, at the ethanol phase change's temperature, the mechanical force required to move the soft robot is provided. The evaluation of soft robot dynamic operation showed optimal response on the first and second working days (8.55 and 6.2mm of displacement, respectively). Also, the external and internal temperature of the composite indicates the temperature stability of the material, which respectively reached a maximum of 48 and 81°C. Also, at the end of the actuation period on the seventh day, the material had about 11% weight reduction due to ethanol loss, which indicates the desirable performance of the composite in terms of storage and retention of the phase-changing fluid.

Key Words Soft robot, Dynamic operation, Phase change fluid, Silicon, Ethanol.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۰۰/۱/۲۲ و تاریخ پذیرش ۰۰/۶/۸ می‌باشد.

(۱) دانشجو دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۲) دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی متالورژی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۳) استادیار ، گروه مهندسی متالورژی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۴) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

Email: safaie@um.ac.ir

DOI: 10.22067/jmme.2021.69788.1012

مقدمه

مکانیزم‌های حرکتی در سیستم‌های زیستی و بیولوژیکی، همواره الهام‌بخش مهندسین رباتیک در طراحی سیستم‌های چند منظوره و چندکاره بوده‌اند [3-1]. ابداعات و نتایج خلاقانه حاصل از این تحقیقات، منجر به ایجاد حوزه نوینی در رباتیک، تحت عنوان ربات‌های نرم شده است. ربات‌های نرم در مقایسه با ربات‌های مرسوم از ویژگی‌های متمایزی برخوردارند. ساختار ربات‌های مرسوم از موادی با سفتی و استحکام بالا همانند فولاد، آلومینیوم، تیتانیوم، فولاد ضدزنگ و... تشکیل شده است [6-4]. این در حالی است که بدنه اصلی و بخش‌های متحرک ربات‌های نرم را موادی با الاستیسیته بسیار بالا هم‌چون پلیمرها، لاستیک‌ها، سیلیکون و یا سایر مواد با قابلیت ارتجاعی بالا تشکیل داده اند. سفتی مواد تشکیل‌دهنده ربات‌های نرم در بازه ۱۰۹–۱۰٤ پاسکال است که مشابه با خواص پوست و بافت‌های عضلانی–زیستی است [9-7].

ربات‌های سخت مرسوم اغلب به کمک موتورهای الکتریکی، پمپ‌های هیدرولیکی یا کمپرسورهای پنوماتیکی قادر به تولید نیروهایی در بازه چند میلی نیوتن (mN) تا مگانیوتن (MN) هستند [10]. هرچند یکی از معایب اصلی ربات‌های نرم عدم توانایی تولید نیروهای بالا به علت ساختار الاستیکی است، اما در مقابل عیب مذکور، ربات‌های نرم ساخته شده از مواد منعطف و کشسان، مزایای متعددی نسبت به ربات‌های سخت دارند. از جمله این که ربات‌های مذکور بواسطه کاهش احتمال آسیب به خود و هم‌چنین برخورد مخاطره‌آمیز با محیط پیرامون، قادر به تعاملی ایمن‌تر با انسان و محیط در مقایسه با ربات‌های سخت مرسوم می‌باشند. ویژگی مذکور سبب توسعه کاربرد ربات‌های نرم در تجهیزات پوششی و کاربردهای پزشکی شده است [13-11]. علاوه‌بر این، ربات‌های نرم به علت ساختار و الگوریتم کنترلی ساده‌تر، از برتری ذاتی نسبت به ربات‌های سخت در حرکات مربوط به گرفتن اشیاء برخوردار می‌باشند. ربات‌های نرم با برخورداری از ویژگی و مزیت‌های منحصر به فرد و متمایز، حوزه‌های کاربری متنوع و گسترده‌ای دارند [14,15].

ربات‌های نرم غالبا بر اساس انبساط و انقباض محفظه و بستر الاستومری، تحت فشارهای مثبت و منفی تهییج و راه‌اندازی می‌شوند. تحریک مذکور بواسطه تجهیزات پنوماتیکی یا هیدرولیکی و تحت عنوان عملگرهای سیال الاستومری (Fluidic Elastomer Actuators (FEA)) یا مواد تغییر فازدهنده به عنوان جزء ثانویه در ماده مرکب صورت می‌پذیرد [6,16-19].

با توجه به حرکات منحنی شکل و منعطف مورد انتظار از ربات‌های نرم، مواد تشکیل‌دهنده ربات‌های مذکور غالبا سیلیکون و یا لاستیک است. در همین راستا، رویکرد جهت ساخت کامپوزیتی برخوردار از هر دو ویژگی نرمی و پاسخگویی به محرک، استفاده از زمینه الاستومری غیرفعال با خاصیت کشسان و فاز ثانویه تحریک‌شونده است [22-20]. به عنوان مثال Wang و همکارانش، رباتی نرم با مشخصه پاسخگویی به تحریک مغناطیسی با استفاده از میکرو ذرات نئودیوم–آهن–بور (NdFeB) به عنوان فاز ثانویه تعبیه شده در زمینه سیلیکون الاستومر ساخته‌اند [23]. مثالی دیگر در خصوص ادغام مواد پاسخگو به محرک با مواد غیرفعال و کشسان، کامپوزیت تشکیل شده از سیلیکون(زمینه) و پارافین(فاز ثانویه) است. طبق گزارش Lipton و همکارانش، کامپوزیت مذکور بواسطه تغییر فاز پارافین از جامد به مایع، انبساط حجمی در حدود ۱۰٪ از خود به نمایش می‌گذارند. علی رغم پیشرفت‌های صورت گرفته در خصوص توسعه مواد فعال و پاسخگو، تاکنون هیچ عملگر نرم قدرتمند و مستقل از تجهیزات بیرونی، با قابلیت تحریک الکتریکی و ارائه تنش و کرنشی قابل مقایسه با ماهیچه‌های طبیعی ساخته نشده است [26-24].

اخیرا طبق تحقیق صورت گرفته توسط گروه پژوهشی حاضر، ربات نرم یکپارچه و مستقلی با قابلیت تحریک الکتریکی و تولید نیروی مکانیکی بواسطه تغییر فاز از مایع به بخار جزء ثانویه در زمینه پلیمری ساخته شده است. کامپوزیت مورد نظر به کمک اختلاط سیلیکون الاستومر به عنوان زمینه کشسان با اتانول به عنوان فاز ثانویه تغییر فازدهنده در اثر گرمای ژول و سپس پخت در دمای اتاق

ساخته شد. کامپوزیت مذکور با قابلیت پاسخگویی به تحریک الکتریکی، به عنوان نسل جدیدی از عملگرهای نرم، قدرتمند و مستقل از تجهیزات بیرونی شناخته می‌شود. از نیازمندی‌های اساسی مهندسین رباتیک جهت طراحی عملگرهای نرم، شناخت کامل از کامپوزیت بواسطه مشخصه‌یابی دقیق و بررسی رابطه میان ترکیب شیمیایی، ساختار و خواص آن است. در پاسخ به این نیاز، در پژوهش حاضر، کامپوزیت الاستومری در درصد حجمی بهینه از اتانول ساخته و رفتار حرکتی عملگر مذکور در سیکل‌های متعدد کاری و روزهای متفاوت تحت بررسی و آزمون قرار گرفت. هم‌چنین دمای هسته و سطح عملگر به عنوان عامل کلیدی دیگر، در کنار رفتار حرکتی مورد بررسی قرار گرفت.

تجربی

مواد

در انتخاب زمینه پلیمری و سیال تغییر فازدهنده، عواملی همچون خواص مکانیکی مورد انتظار از پلیمر، نقطه جوش فاز ثانویه، محدودیت‌های کاربری سیال و سازگاری شیمیایی مورد نظر قرار گرفت. در این پژوهش از سیلیکون الاستومر دو جزئی (سیلیکون و هاردنر)، به عنوان زمینه کامپوزیت و از اتانول (با خلوص بیش از ۹۹/۵٪ و نقطه جوش ۷۸/۳۲°C ساخت سیگما شیمی-ایران)، به عنوان سیال تغییر فازدهنده استفاده شد. همچنین جهت ایجاد گرمای ژول سیم مقاومتی نیکل-کروم به قطر ۰/۲۵mm در داخل نمونه به شکل فنری کارگذاری شد و تحت تحریک الکتریکی قرار گرفت.

دستگاه‌ها و روش‌ها

آماده سازی کامپوزیت. طبق پژوهش پیشین انجام شده، کامپوزیت سیلیکون-اتانول در درصد بهینه سیال تغییر فازدهنده معادل با ۳۰٪ حجمی، با اختلاط مکانیکی تهیه شد. پس از گذشت مدت زمان تقریبی ۵ دقیقه از اختلاط سیلیکون با اتانول، هاردنر با نسبت وزنی ۱ به ۵۰ (نسبت به وزن سیلیکون) به مخلوط اضافه و اختلاط برای مدت زمان ۲ دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد. پس از این مرحله، ماده حاصل جهت ریخته‌گری درون قالب از جنس پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) و به ابعاد ۹۰×۱۵×۱۵mm آماده گردید. سیم مقاومتی از جنس Ni-Cr به طول ۷۵cm بواسطه پیچش به دور شفتی فولادی به شکل مارپیچ در آمده و درون قالب جانمایی شد. پس از قالب‌گیری، پخت در دمای اتاق و به مدت زمان ٤ ساعت انجام شد.

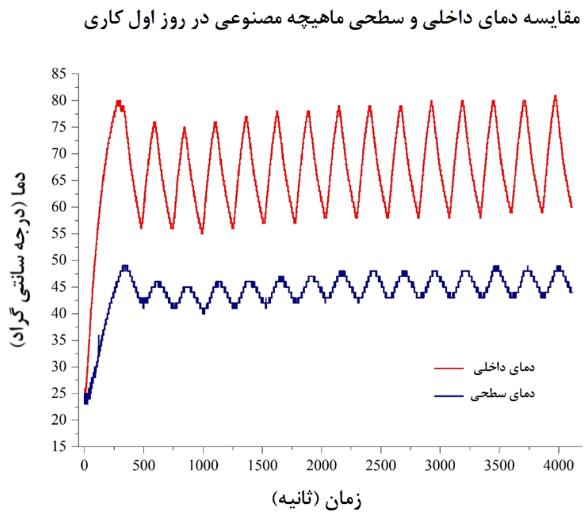
سخت‌افزار ثبت داده. جهت بررسی مورفولوژی سطحی و بزرگی اندازه حفرات در کامپوزیت سیلیکون-اتانول، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی(FESEM)، تحت ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۰kV استفاده شد. نمونه قبل از انجام آزمون، بصورت برودتی شکسته و سطح شکست با کند و پاش طلا (به منظور جلوگیری از تجمع بار سطحی و ایجاد تصویر با وضوح بالاتر) تحت پوشش‌دهی قرار گرفت. از منبع تغذیه آنالوگ مدل R&S NGPV (Rohde & Schwarz) جهت تحریک الکتریکی ربات نرم استفاده شد. در هر سیکل تحریکی به نمونه‌ها ولتاژ و جریانی به ترتیب معادل با ۲۰V و ۰/٦A (۱۲ وات) اعمال شد. جهت بررسی تغییرات دمای سطحی عملگر در حین سیکل‌های تحریکی، از حسگر تشخیص دما LM35 و جهت بررسی تغییرات دمای داخلی آن از حسگر تشخیص دما مدل pt1000 استفاده گردید. هم‌چنین به منظور ثبت رفتار حرکتی ربات نرم از دوربین دیجیتالی (Canon-ژاپن) استفاده شد. بدین منظور دوربین در موقعیت عمود بر نمونه قرار گرفت و همزمان با شروع آزمایشات، تصاویری از تغییر شکل ماهیچه ثبت کرد. همچنین برای محاسبه دقیق مقدار تغییر ابعاد و جابجایی ماده از روش معرفی شده توسط زامیاد [27] استفاده شد. به دلیل عمود بودن دوربین بر نمونه، علاوه بر تغییر ابعاد طولی، تغییر ابعاد عرض ماده نیز قابل اندازه‌گیری است. البته در این پژوهش به دلیل محدود بودن تغییر ابعاد عرضی ماده، نمودارها و تفاسیر بیشتر به تغییر ابعاد طولی ماده معطوف شد.

نتایج و بحث

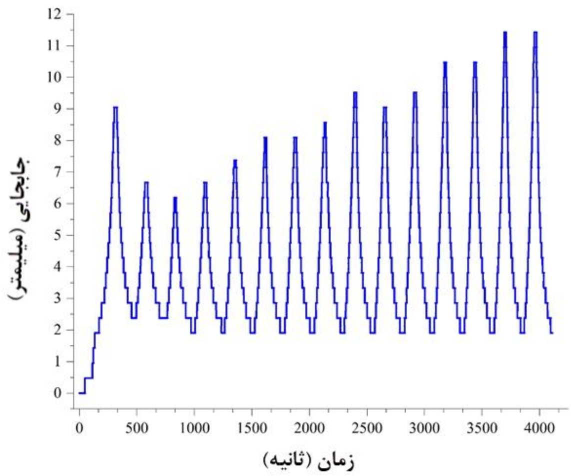
بررسی رفتار حرکتی و پاسخ دمایی ربات نرم در اولین روز کاری

در کامپوزیت ساخته شده، تغییر فاز مایع-گاز اتانول درون میکرو حفرات سیلیکونی زمینه، به عنوان عاملی جهت تولید نیروی مکانیکی بواسطه ایجاد فشار داخلی معرفی می‌شود. جهت بررسی پاسخ دمایی و رفتار حرکتی ربات نرم، کامپوزیتی با ۳۰٪ حجمی اتانول ساخته و تحت تحریک الکتریکی (12W= ۲۰V× ۰/٦A) قرار گرفت. در اثر عبور جریان از درون سیم به شکل مارپیچ، سیم بواسطه مقاومت ذاتی خود شروع به گرم شدن نموده که عامل مذکور سبب گرم شدن کامپوزیت در اثر گرمای ژول از دمای اتاق(۲۵°C) شد. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، دمای سطح و هسته کامپوزیت بطور پیوسته از لحظه‌ی شروع تحریک الکتریکی توسط دو حسگر تشخیص دمای سطحی و داخلی ثبت شد. کامپوزیت در اثر گرمای ژول از دمای اتاق(۲۵°C) شروع به گرم شدن نموده و تا نقطه جوش اتانول (۷۸/۳۲°C =T) ادامه یافت. با قراردهی سنسور تشخیص دما بر روی سطح ماهیچه، تغییرات دمایی آن در بازه T=°۲۵C تا T=°٤۹C ثبت شد (شکل ۱). با رسیدن دمای هسته به حدود ۸۰°C انبساط ماده به علت جوشش اتانول با سرعت بیشتری انجام و مقدار جابه‌جایی ثبت شده متناظر با آن ۲۲mm(۲۵٪) ثبت شد(شکل ۲). در سیکل اول کاری با توجه به هم‌دما بودن کامپوزیت با محیط پیرامون (°۲۵C)، به منظور رسیدن دمای هسته به دمای ۷۸/۳۲°C، معادل با دمای تغییر فاز اتانول از حالت مایع به گاز و مشاهده جابه‌جایی برابر با ۲۰٪ (معادل با کشش عضلات طبیعی [۲۸])، مدت زمان تقریبی معادل با ۳۲۰s سپری شد. با توجه به انبارش انرژی حرارتی داخل ماده، دومین سیکل تحریکی از دمای داخلی معادل با ۵۵°C (دمای هسته) شروع که منجر به کاهش طول مدت تحریک به زمان حدودی ۱۱۰s برای رسیدن به مقدار جابه‌جایی یکسان گردید. لازم به ذکر است که زمان استراحت ماهیچه جهت رسیدن به طول اولیه خود (۹۰mm) در طول سیکل‌های تحریکی اول و دوم به ترتیب برابر با ۱۹۰ و ۱۵۰ ثانیه ثبت شد. در ادامه با ثابت نگه داشتن زمان تحریک (۱۱۰s) جهت یکسان‌سازی انرژی اعمالی به ربات نرم در تمامی سیکل‌های کاری و هم‌چنین زمان استراحت (۱۵۰s) جهت رسیدن به طول اولیه، آزمون انجام و پاسخ دمایی (شکل ۱) و رفتار حرکتی(شکل ۲) آن بررسی شد.

با توجه به شکل (۱)، دمای هسته ربات در اثر تحریک الکتریکی و گرمای ژول، در بازه ۸۰-۵۵ و دمای سطحی در بازه ٤۷-٤۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. علت بزرگتر بودن بازه تغییرات دمای هسته (°۲۵C) نسبت به دمای سطح کامپوزیت (°۷C) را می‌توان انتقال پیوسته حرارت از قسمت درونی ربات به وجوه بیرونی حتی در زمان استراحت ربات دانست. با رسیدن دمای هسته ماهیچه به °۷۸C، انبساط ماده به علت جوشش اتانول با سرعت بیشتری صورت گرفته و مقدار جابه‌جایی طولی ثبت شده متناظر با آن به طور میانگین ۸/۵mm است(شکل۲). به نظر می‌رسد با افزایش سیکل‌های کاری، بخش‌های مختلف نمونه گرم شده و مقدار بیشتری از اتانول (که در بسته‌ها و کپسول‌هایی با اندازه میکرونی در زمینه سیلیکونی توزیع شده است) به دمای انتقال فازی می‌رسد. این امر منجر به افزایش قابلیت جابه‌جایی ماده در هر سیکل کاری می‌گردد؛ به طوری که پس از گذشت ۱۵ سیکل تحریکی، مقدار جابه‌جایی طولی ربات به ۱۱mm افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است حداکثر جابجایی عرضی ماده حدود ۵/۵mm است که نشان می‌دهد جابجایی طولی ماده، دو برابر جابجایی عرضی است. یکی از دلایل اصلی این تفاوت، قرارگیری سیم‌پیچ (المنت فنری شکل) به صورت طولی در داخل نمونه است. پاسخ دمایی ربات به تحریک الکتریکی پس از گذشت ٤۰۰۰ ثانیه کاملا یکنواخت و پایدار بوده که مویدی بر رفتار مطلوب ماده است.



شکل ۱ پاسخ دمایی ربات نرم به تحریک الکتریکی در سیکل‌های متوالی در اولین روز کاری



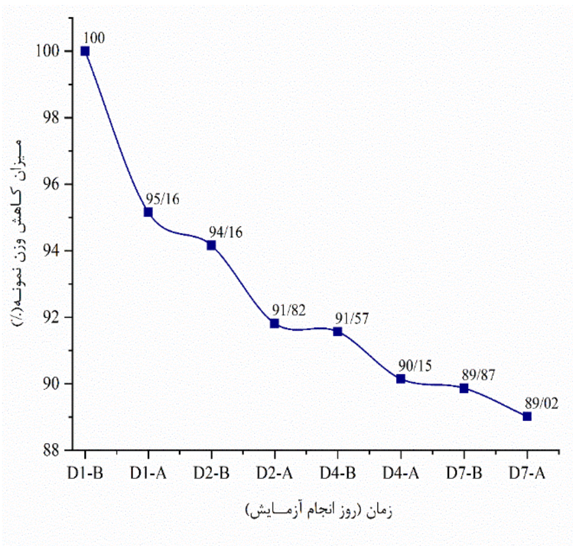
شکل ۲ عملکرد حرکتی (جابجایی طولی) ربات نرم در اثر تحریک الکتریکی در سیکل‌های متوالی و اولین روز کاری

بررسی تأثیر متغیر زمان بر رفتار ربات نرم

تأثیر متغیر زمان بر عملکرد حرکتی، پاسخ دمایی و ترکیب شیمیایی ربات نرم، در سه بازه زمانی معادل با روز دوم، چهارم و هفتم پس از ساخت ربات بررسی شد. در هر روز کاری تعداد دوره های تحریک الکتریکی برابر ۱۵ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تحریک الکتریکی با ثابت نگه داشتن تمامی متغیرها از جمله جریان و ولتاژ، زمان تحریک و استراحت انجام و در ادامه دمای سطح و هسته، میزان جابه‌جایی و تغییرات وزنی کامپوزیت اندازه‌گیری شد.

بررسی ترکیب شیمیایی و تغییرات وزنی کامپوزیت. به منظور بررسی تاثیر متغیر زمان و سیکل‌های متعدد کاری بر میزان حذف اتانول از ساختار کامپوزیت و تغییر ترکیب شیمیایی، نمونه ساخته شده پیش از آغاز هر دوره تحریکی و پس از پایان آن توزین شد (شکل ۳). به منظور سهولت، کامپوزیت مورد نظر بصورت D1-B و D1-A نام‌گذاری شد که به ترتیب بیانگر روز اول و قبل از آغاز تحریک و روز اول پس از اتمام تحریک است.

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، نمونه پس از اتمام فرایند تحریک الکتریکی در پایان روز اول(D1-A)، ٤/۸٤٪ از وزن خود را از دست داده و وزن کل نمونه به ۹۵/۱٦٪ کاهش یافته است. وزن از دست رفته مذکور، صرفا به علت هدر رفت اتانول از ساختار کامپوزیت است. در روز دوم تحریک، معادل با زمان D2-B، درصد جرم کل باقی‌مانده از نمونه برابر با ۹٤/۱٦٪ بوده که نسبت به زمان D1-A، کامپوزیت به میزان ۱٪ وزن خود را از دست داده است. علت کاهش جرم مذکور را می‌توان به خروج اتانول از ساختار کامپوزیت در مدت زمان نگهداری نسبت داد.



شکل ۳ تغییرات وزنی کامپوزیت در طی هفت روز کاری

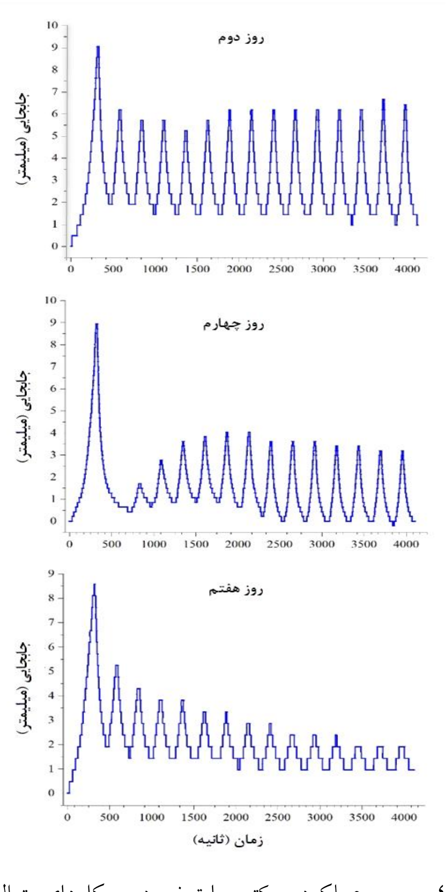
با توجه به جدول (۱)، اختلاف داده‌های وزنی در زمان‌های D2-B و D2-A برابر با ۲/۳۴٪ بوده که در مقایسه با کاهش جرم اتانول در اولین روز تحریک(۴/۸۴٪) کمتر است. در اولین روز تحریک، مقدار قابل ملاحظه سیال از دست رفته مربوط به اتانول‌های موجود در وجوه بیرونی کامپوزیت است. با خروج اتانول از ضخامت نازکی از وجوه بیرونی کامپوزیت، این ضخامت که اتانول خود را از دست داده به عنوان لایه غیرفعال عمل کرده و از خروج اتانول‌های موجود در میکروکپسول‌های قسمت درونی ماده جلوگیری می‌کند. با ادامه فرآیند تحریک تا روز هفتم، به تدریج ضخامت لایه غیرفعال مذکور بیشتر شده که در نتیجه این امر، خروج اتانول از داخل ساختار کامپوزیت به مقدار کمتری انجام می‌شود؛ به طوری که در روز هفتم تحریک، ماده تنها ۰/۶۷٪ از اتانول خود را از دست می‌دهد. علاوه‌بر این، با کاهش تدریجی مقدار اتانول باقی‌مانده در ساختار کامپوزیت، میزان اتانول از دست رفته در طول بازه‌های نگهداری و هم‌چنین طول دوره تحریک کاهش می‌یابد.

جدول ۱ بررسی درصد کاهش جرم کامپوزیت در دوره‌های تحریکی مختلف

زمان (روز)	اول	دوم	چهارم	هفتم
کاهش جرم نمونه (٪)	۴/۸۴	۲/۳۴	۱/۴۲	۰/۶۷

بررسی رفتار حرکتی کامپوزیت. در ادامه مقدار جابه‌جایی ربات نرم در روزها و سیکل‌های مختلف کاری بررسی و نتایج حاصله در شکل (۴) و جدول (۲) آمده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، مقدار جابه‌جایی ربات نرم با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، به‌طور متوسط حداکثر مقدار جابه‌جایی ربات نرم در روز اول برابر با ۸/۵mm بوده که این عدد در روز هفتم به ۲/۸۵mm کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در دو عامل مهم بررسی نمود: ۱. افزایش ضخامت لایه غیر فعال، ۲. کاهش حجم سیال تغییر فازدهنده. با حذف اتانول سطحی از وجوه بیرونی عملگر، لایه‌ای عاری از سیال تغییرفازدهنده در اطراف ماده تشکیل شده که به‌عنوان لایه غیرفعال عمل می‌کند. این لایه غیرفعال با اعمال نیروی الاستیک و کشسان، از حرکت آزادانه عملگر جلوگیری می‌کند. با گذشت روزهای متوالی و هم‌چنین اعمال سیکل‌های متعدد به ربات، به تدریج ضخامت لایه مذکور بیشتر شده و نقش آن در جلوگیری از رسیدن به مقدار جابه‌جایی حداکثری اولیه بیشتر می‌گردد. همچنین با کاهش حجم سیال تغییر فازدهنده و به دنبال آن کاهش تولید نیروی مکانیکی بواسطه ایجاد فشار مثبت داخلی در اثر تغییر فاز از مایع به بخار اتانول، عملکرد حرکتی ربات به تدریج تضعیف می‌شود.

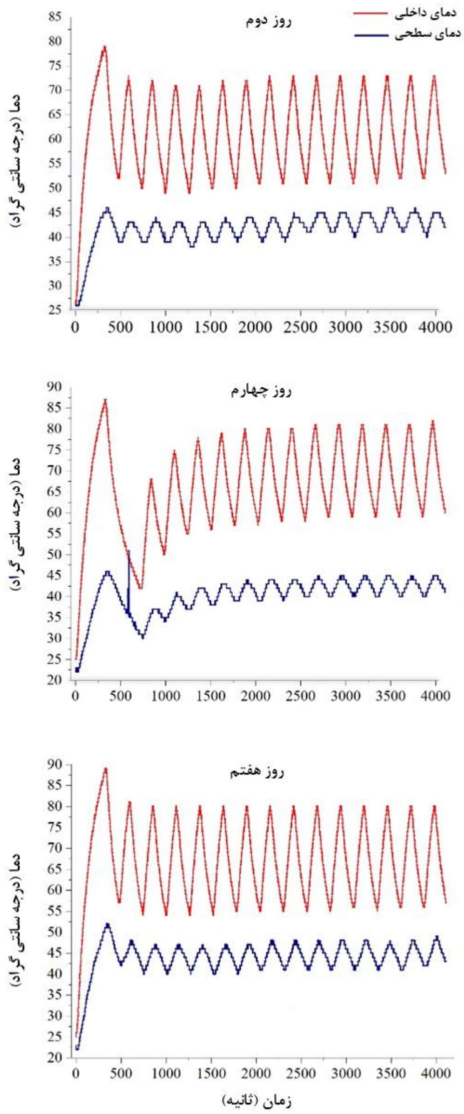


شکل ۴ بررسی عملکرد حرکتی ربات نرم در سیکل‌های متوالی و در روزهای کاری ۲ تا ۷

جدول ۲ بررسی متوسط حداکثر مقدار جابه‌جایی دست‌یافته در روزهای کاری مختلف

زمان (روز)	اول	دوم	چهارم	هفتم
میانگین مقدار بیشینه جابجایی (میلیمتر)	۸/۵۵	۶/۲	۳/۶۱	۲/۸۵

بررسی پاسخ دمایی ربات نرم. در ادامه پاسخ دمایی ربات نرم در روزها و سیکل‌های مختلف کاری بررسی و نتایج حاصله در شکل (۵) و جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۵ بررسی پاسخ دمایی ربات نرم در سیکل‌های متوالی و در روزهای کاری ۲ تا ۷

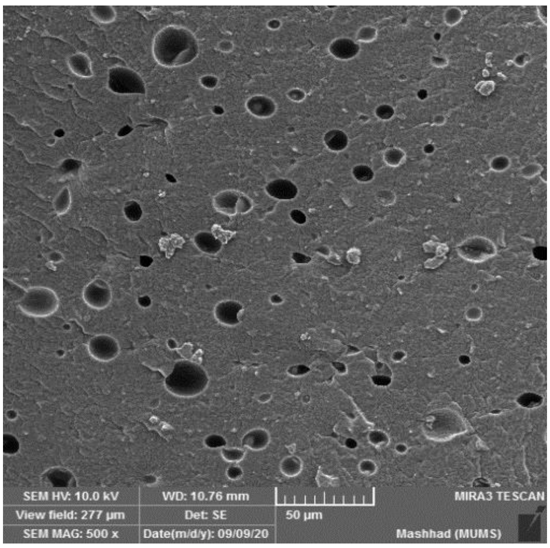
جدول ۳ بررسی متوسط حداکثر دمای داخلی در روزهای کاری مختلف

زمان (روز)	اول	دوم	چهارم	هفتم
میانگین بیشینه دمای داخلی (°C)	۷۸/۹	۷۳/۱	۸۱	۸۱

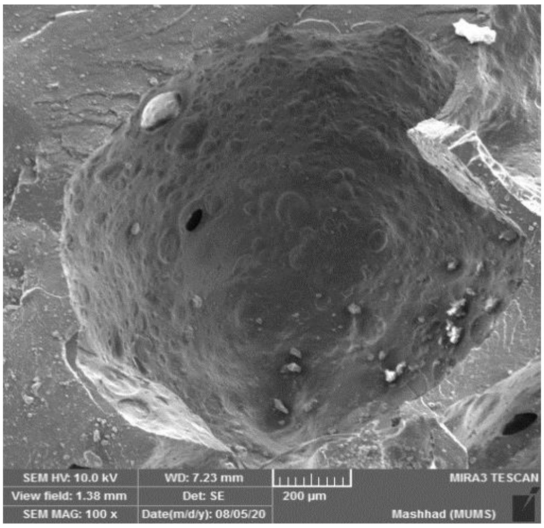
همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، متوسط حداکثر دمای داخلی نسبت به روز اول تحریک به مقدار ۲°C افزایش یافته است. کاهش حجم اتانول عاملی جهت جذب و انبارش انرژی حاصل از تحریک الکتریکی و گرمایش ژول را می‌توان دلیل این پدیده دانست. علی رغم افزایش نسبی دمای هسته با گذشت سیکل‌های متعدد و روزهای کاری مختلف، دمای داخل ماده افزایش قابل توجهی از خود نشان نداده که نشان از پایداری حرارتی ماده در طول مدت زمان کاربری است.

بررسی ساختار میکروسکوپی کامپوزیت

جهت بررسی ساختار میکروسکوپی ربات نرم، کامپوزیت پس از گذشت ۱۵ سیکل تحریکی در روز هفتم، بصورت برودتی شکسته شده و سطح شکست به کمک میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی مورد مشاهده قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (٦) مشاهده می‌شود، اتانول پس از اختلاط درون زمینه سیلیکونی در داخل کپسول‌هایی با سطوح صاف و صیقلی به بزرگی میکرون (شکل ٦- الف) و همچنین داخل حباب‌های هوایی با اندازه بزرگتر (شکل ٦- ب)، بصورت یکنواخت و همگن توزیع شده است. بسته‌های مذکور بصورت تفکیک شده و مجزا از یکدیگر بوده که امکان توزیع اتانول در مقادیر کوچک و کم را در سراسر حجم ماده زمینه فراهم می‌آورد.



(الف)



(ب)

شکل ٦ بررسی ساختار میکروسکوپی کامپوزیت سیلیکون/اتانول در روز هفتم و پس از ۱۵ سیکل تحریکی، (الف) میکروکپسول‌های صاف و صیقلی به بزرگی میکرون، (ب) حباب‌های هوایی به بزرگی میلی‌متر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیت پلیمری متشکل از سیلیکون الاستومر به عنوان زمینه و اتانول به عنوان سیال تغییر فازدهنده ساخته شد. کامپوزیت حاصله به عنوان ربات نرم معرفی و خواص آن مورد ارزیابی قرار گرفت. کامپوزیت مذکور در درصد بهینه از اتانول ساخته و عملکرد حرکتی و پاسخ دمایی آن به عنوان دو مولفه کلیدی مورد بررسی قرار گرفت. با رسیدن دمای هسته ماهیچه به حدود ۷۸°C، انبساط ماده به علت جوشش اتانول با سرعت بیشتری انجام و حداکثر مقدار جابه‌جایی ثبت شده متناظر با آن در اولین روز تحریک برابر با ۸/۵mm ثبت شد. در ادامه با توزین نمونه در شروع و پایان هر دوره تحریکی مقدار هدر رفت اتانول به عنوان فاز پاسخگو به محرک مورد بررسی قرار گرفت. هرچند که در اولین دوره تحریکی، مقدار هدر رفت اتانول بیشترین مقدار(٪٤/٨٤) را داشت ولی با ادامه فرآیند تحریک تا روز هفتم، به تدریج ضخامت لایه غیرفعال بیشتر شده که در نتیجه این امر خروج اتانول از داخل ساختار کامپوزیت به حداقل مقدار خود(۰/٦٧) رسید. هم‌چنین به علت کاهش حجم اتانول، متوسط حداکثر دمای داخلی نسبت به اولین روز تحریک به مقدار ۲°C افزایش یافت. لازم به ذکر است علی رغم افزایش نسبی دمای هسته کامپوزیت، ماده پایداری حرارتی مطلوبی را در طول مدت زمان کاربری از خود به نمایش گذاشت. هم‌چنین طبق مشاهدات انجام شده بر روی ساختار میکروسکوپی ماهیچه به کمک میکروسکوپ FESEM، مشخص شد که اتانول در سراسر زمینه سیلیکونی و داخل بسته‌هایی کروی شکل در اندازه میکرونی و هم‌چنین داخل حباب‌های هوایی بصورت یکنواخت و همگن توزیع شده است.

مراجع

1. Hülse, M., Wischmann, S., & Pasemann, F., "The role of non-linearity for evolved multifunctional robot behavior", *In International Conference on Evolvable Systems*, pp. 108-118, Springer, Berlin, Heidelberg, September, (2005).
2. Trivedi, D., Rahn, C. D., Kier, W. M., & Walker, I. D., "Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research", *Applied bionics and biomechanics*, Vol. 5, NO. 3, pp. 99-117, (2008).
3. Laschi, C., & Cianchetti, M., "Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control", Frontiers in bioengineering and biotechnology, Vol. 2, (2014).
4. Rus, D., & Tolley, M. T., "Design, fabrication and control of soft robots", *Nature*, Vol. 521, NO. 7553, pp. 467-475, (2015).
5. Case, J. C., White, E. L., & Kramer, R. K., "Soft material characterization for robotic applications", *Soft*

Robotics, Vol. 2, NO. 2, pp. 80-87, (2015).

6. Ilievski, F., Mazzeo, A. D., Shepherd, R. F., Chen, X., & Whitesides, G. M., "Soft robotics for chemists", *Angewandte Chemie,* Vol. 123, NO. 8, pp. 1930-1935, (2011).
7. Seok, S., Onal, C. D., Cho, K. J., Wood, R. J., Rus, D., & Kim, S., "Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators", *IEEE/ASME Transactions on mechatronics,* Vol. 18, NO 5, pp. 1485-1497, (2012).
8. Lin, H. T., Leisk, G. G., & Trimmer, B., "GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot", *Bioinspiration & biomimetics,* Vol. 6, NO. 2, (2011).
9. Laschi, C., Cianchetti, M., Mazzolai, B., Margheri, L., Follador, M., & Dario, P., "Soft robot arm inspired by the octopus", *Advanced robotics,* Vol. 26, NO. 7, pp. 709-727, (2012).
10. Lee, C., Kim, M., Kim, Y. J., Hong, N., Ryu, S., Kim, H. J., & Kim, S., "Soft robot review", *International Journal of Control, Automation and Systems,* Vol. 15, NO.1, pp. 3-15, (2017).
11. Chen, F. J., Dirven, S., Xu, W. L., & Li, X. N., "Soft actuator mimicking human esophageal peristalsis for a swallowing robot", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,* Vol. 19, NO. 4, pp. 1300-1308, (2013).
12. Renda, F., Cianchetti, M., Giorelli, M., Arienti, A., & Laschi, C. "A 3D steady-state model of a tendon-driven continuum soft manipulator inspired by the octopus arm", *Bioinspiration & biomimetics,* Vol. 7, NO.2, (2012).
13. Cianchetti, M., Ranzani, T., Gerboni, G., Nanayakkara, T., Althoefer, K., Dasgupta, P., & Menciassi, A., "Soft robotics technologies to address shortcomings in today's minimally invasive surgery: the STIFF-FLOP approach", *Soft robotics,* Vol. 1, NO.2, pp. 122-131, (2014).
14. Deimel, R., & Brock, O., "A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping", *The International Journal of Robotics Research,* Vol. 35, NO. 1-3, pp. 161-185, (2016).
15. Ilievski, F., Mazzeo, A. D., Shepherd, R. F., Chen, X., & Whitesides, G. M., "Titelbild: Soft robotics for chemists (angew. chem. 8/2011)", *Angewandte Chemie,* Vol. 123, NO. 8, pp. 1765-1765, (2011).
16. Mirfakhrai, T., Madden, J. D., & Baughman, R. H., "Polymer artificial muscles", *Materials today,* Vol. 10, NO. 4, pp. 30-38, (2007).
17. Katzschmann, R. K., Marchese, A. D., & Rus, D., "Hydraulic autonomous soft robotic fish for 3D swimming", *In Experimental Robotics*, pp. 405-420, Springer, Cham, (2016).
18. Polygerinos, P., Wang, Z., Galloway, K. C., Wood, R. J., & Walsh, C. J., "Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation", *Robotics and Autonomous Systems,* Vol. 73, pp. 135-143, (2015).
19. Otero, T. F., & Sansieña, J. M., "Soft and wet conducting polymers for artificial muscles", *Advanced Materials,* Vol. 10, NO. 6, pp. 491-494, (1998).
20. Miriyev, A., Stack, K., & Lipson, H., "Soft material for soft actuators", *Nature communications,* Vol. 8, NO. 1, pp. 1-8, (2017).
21. Miriyev, A., Xia, B., Joseph, J. C., & Lipson, H., "Additive manufacturing of silicone composites for soft

actuation", *3D Printing and Additive Manufacturing,* Vol. 6, NO. 6, pp. 309-318, (2019).

22. Miriyev, A., Trujillo, C., Caires, G., & Lipson, H., "Rejuvenation of soft material–actuator", *MRS Communications,* Vol. 8, NO. 2, pp. 556-561, (2018).
23. Cui, H., Zhao, Q., Wang, Y., & Du, X., "Bioinspired actuators based on stimuli- responsive polymers", *Chemistry–An Asian Journal,* Vol. 14, NO. 14, pp. 2369-2387, (2019).
24. Haines, C. S., Lima, M. D., Li, N., Spinks, G. M., Foroughi, J., Madden, J. D., ... & Baughman, R. H., "Artificial muscles from fishing line and sewing thread", *science,* Vol. 343, NO. 6173, pp. 868-872, (2014).
25. Hu, W., Lum, G. Z., Mastrangeli, M., & Sitti, M., "Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion", *Nature,* Vol. 554, NO. 7690, pp. 81-85, (2018).
26. Lipton, J. I., Angle, S., Banai, R. E., Peretz, E., & Lipson, H., "Electrically actuated hydraulic solids", *Advanced Engineering Materials,* Vol. 18, NO. 10, pp. 1710-1715, (2016).
27. Zamyad, H., & Naghavi, N., "Behavior identification of IPMC actuators using Laguerre-MLP network with consideration of ambient temperature and humidity effects on their performance", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* Vol. 67, NO.11, pp. 2723-2732, (2018).
28. Mirvakili, S. M., & Hunter, I. W., "Artificial muscles: Mechanisms, applications, and challenges", *Advanced Materials,* Vol. 30, NO.6, 1704407, (2018).